

Pemantauan Keberhasilan Reforestasi di Kawasan Pertambangan Melalui Model Indeks Tanah

Reforestation Achievement Monitoring at Mining Area through Soil Index Model

Nining Puspaningsih^{1*}, Kukuh Murti Laksono², Naik Sinukaban², I Nengah Surati Jaya¹, dan Yadi Setiadi³

¹Departemen Manajemen Hutan, Fakultas Kehutanan IPB, Bogor

²Departemen Ilmu Tanah, Fakultas Pertanian IPB, Bogor

³Departemen Silvikultur, Fakultas Kehutanan IPB, Bogor

Abstract

The achievement of the reforestation is expected to reach a climax forest ecosystem. The objectives of this study was to develop soil index model on monitoring of reforestation achievement. The study used a statistical approach to obtain soil index model to determine the achievement level of reforestation in mining area. The achievement indices for each variable were derived from the best regression model developed, while the weights of each variable were computed based on magnitude of regression coefficient for each indicator. The level of reforestation achievement index was initially developed by the use of 4 indicators, i.e. physical soil, biological soil, chemical soil, and litter index. Of those indicators, the study revealed that the heights weight for reforestation monitoring was chemical soil, which is composed pH, cation exchange capacity (CEC), macro-micro nutrient, and base saturation.

Keywords: *index model, chemical soil, mining area, litter index, reforestation*

**Penulis untuk korespondensi, email: n_puspaningsih@yahoo.com*

Pendahuluan

Hutan hujan tropis primer merupakan suatu ekosistem yang sangat ideal dengan keanekaragaman hayati yang tinggi, siklus hara yang tertutup, stratifikasi tajuk yang tinggi, selalu hijau sepanjang tahun, dan bersifat konstan yang terus menerus ada serta tahan terhadap gangguan. Selain bersifat konstan, hutan hujan tropis primer juga mempunyai sifat *self nutrient recovery*, yaitu 2/3 nutrisi yang ada pada tanaman dilepas ke tubuh tanaman itu lagi sebelum tanaman tersebut menggugurkan daunnya (Setiadi 2005). Dengan karakteristik tersebut maka hutan hujan tropis mempunyai fungsi proteksi, konservasi, dan produksi. Fungsi proteksi yaitu melindungi sistem penyangga kehidupan seperti mengatur tata air, mengendalikan erosi, mencegah banjir, dan menjaga kesuburan tanah. Fungsi konservasi yaitu mempertahankan keanekaragaman hayati, mempertahankan keseimbangan ekosistem tanah, air, vegetasi, serta menjaga keseimbangan iklim khususnya iklim mikro. Dalam hal fungsi produksi, hutan hujan tropis sangat kaya akan sumber daya alam yang mempunyai nilai ekonomi yang tinggi.

Pemanfaatan sumber daya lahan untuk pertambangan, pembalakan hutan, pertanian dan lainnya menyebabkan kerusakan hutan sehingga fungsi hutan menjadi terganggu. Fungsi hutan dimaksudkan sebagai fungsi lindung (hutan lindung) yang menjaga keseimbangan ekosistem air, tanah, vegetasi, dan mengatur keseimbangan iklim, maupun fungsi konservasi (hutan konservasi).

Kerusakan lahan pada kawasan pertambangan yang menggunakan metode penambangan terbuka (*open pit min-*

ing) menyebabkan kerusakan lahan yang berat. Barrow (1991) menyatakan bahwa kegiatan ini menyebabkan hilangnya hutan primer. Hilangnya hutan primer dapat menyebabkan perubahan pada iklim. Hutan hujan tropis dapat menyimpan air hujan yang cukup besar sehingga dapat menjaga iklim di sekitarnya menjadi nyaman, mengurangi fluktuasi temperatur antara siang dan malam, menjaga kelembapan udara, dan mengurangi kecepatan angin. Hilangnya hutan primer juga dapat menyebabkan kehilangan spesies, memberikan dampak terhadap hidrologi dan tanah seperti banjir, erosi, sedimentasi dan longsor, menimbulkan gangguan kesehatan, terjadinya kehilangan hasil hutan, memberikan dampak terhadap sektor ekonomi, dan hilangnya nilai estetika hutan. Lebih jauh, Setiadi (2005) menyatakan bahwa proses pertambangan menyebabkan kerusakan pada vegetasi, binatang, dan tanah, serta ekosistem asli. Dampak terhadap vegetasi yang hilang menyebabkan erosi, sedimentasi, kerusakan pada daerah aliran sungai (DAS), rusaknya habitat satwa yang berujung pada hilangnya biodiversitas.

Mengingat bahaya dampak deforestasi terhadap lingkungan akibat proses pertambangan maka usaha reforestasi hingga terbentuknya hutan hujan tropis yang lestari sangat diperlukan. Reforestasi dilakukan dengan menanam tanaman yang dapat bertahan pada *degraded land* dan dapat memperbaiki kondisi lahan, serta mendorong pertumbuhan tanaman. Pada reforestasi, pola penanganan yang diberikan harus ditujukan pada terjadinya percepatan pemulihan hutan dengan mempercepat terjadinya proses

suksesi untuk membentuk hutan hujan tropis yang lestari (Setiadi 2005).

Keberhasilan reforestasi dapat diketahui melalui pemantauan terhadap keberhasilan reforestasi tersebut. Indikator tanah merupakan faktor yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman sehingga mengkaji indeks tanah adalah sangat penting untuk memantau keberhasilan reforestasi. Tujuan studi ini adalah merumuskan model indeks tanah untuk memantau keberhasilan reforestasi.

Metode

Penelitian dilakukan di kawasan pertambangan nikel PT INCO di Desa Soroako Kabupaten Luwu Utara, Sulawesi Selatan. Lokasi penelitian secara geografis terletak pada 121°22'–121°26' BT dan 2°32'–2°35' LS. Penelitian dilakukan di lokasi tanaman tahun tanam 1985, 1990, 2000–2008 (3.172 ha), serta di hutan alam primer bukit Lembo (527,25 ha). Pengambilan data lapangan dilakukan pada bulan Januari–Maret 2008. Analisis data tanah dilakukan pada bulan April–Oktober 2008 di Laboratorium Tanah Fakultas Pertanian IPB.

Perumusan model kuantitatif Pada kajian ini, model indeks tanah untuk memantau keberhasilan reforestasi didekati dengan salah satu peubah tegakan hutan yang merepresentasikan tingkat kestabilan ekosistem hutan. Peubah yang digunakan untuk mengukur kestabilan tegakan adalah luas bidang dasar ($m^2 ha^{-1}$). Luas bidang dasar (lbds) adalah rasio antara luas penampang diameter setinggi dada per satuan luas. Moran *et al.* (2000) menyatakan bahwa lbds dapat digunakan untuk mengukur tingkat pertumbuhan. Tingkat keberhasilan reforestasi berbanding lurus dengan lbds. Semakin besar lbds maka semakin tinggi tingkat keberhasilan reforestasi. Analisis regresi digunakan untuk mengetahui besar hubungan setiap indikator dengan lbds. Selanjutnya, analisis multikriteria dengan metode pembobotan digunakan untuk merumuskan model indeks tanah untuk memantau keberhasilan reforestasi.

Estimasi tingkat keberhasilan reforestasi Secara matematis, estimasi umur harapan pencapaian keberhasilan reforestasi dinyatakan dengan hubungan lbds dan umur tanaman. Adapun estimasi keberhasilan reforestasi pada setiap indikator dinyatakan dengan hubungan lbds dan nilai hasil observasi setiap indikator. Model matematis diformulasikan dengan model linier dan nonlinier (Draper *et al.* 1992):

$$\text{model linier} \quad y = ax + b \quad [1]$$

$$\text{model polinomial} \quad y = ax^2 + bx + c \quad [2]$$

$$\text{model power} \quad y = axb \quad [3]$$

$$\text{model eksponensial} \quad y = ae^{bx} \quad [4]$$

$$\text{model logaritmik} \quad y = \ln(x) + b \quad [5]$$

keterangan:

x = lbds

y = nilai hasil observasi setiap peubah

Penentuan skor tingkat keberhasilan reforestasi setiap indikator Peubah yang digunakan untuk analisis indeks keberhasilan reforestasi dipresentasikan dengan satuan nilai yang tidak sama. Satuan nilai yang tidak sama tersebut harus disamakan agar dapat dilakukan analisis kuantitatif terhadap tingkat keberhasilan reforestasi. Pada penelitian ini estimasi skor tingkat keberhasilan reforestasi setiap indikator dihitung dengan analisis interpolasi pada setiap indikator yang diberikan dengan nilai skor 10–100 (Jaya 2006). Dalam skor nilai estimasi keberhasilan reforestasi pada setiap indikator, nilai maksimum 100 diberikan pada hutan alam dan nilai 10 diberikan pada umur 1 tahun yang dirumuskan sebagai:

$$\text{Skor} = \{[x - N_{\min}] / [N_{\max} - N_{\min}]\} \times 90 + 10 \quad [6]$$

keterangan:

x = nilai estimasi keberhasilan reforestasi pada setiap peubah

N_{\min} = nilai minimum

N_{\max} = nilai maksimum

Penyusunan model indeks tanah untuk memantau keberhasilan reforestasi Tanah merupakan faktor yang sangat penting bagi pertumbuhan tanaman sehingga mengetahui kondisi tanah sangat penting untuk memantau keberhasilan reforestasi. Sifat-sifat tanah yang mempengaruhi pertumbuhan tanaman antara lain adalah sifat fisik, sifat kimia, sifat biologi tanah, serta ketebalan serasah pada lantai hutan. Pada penelitian ini indeks tanah (T) ditentukan dengan menggunakan indikator indeks serasah (SR), fisika tanah (FT), biologi tanah (BT), dan kimia tanah (KT).

Penyusunan model indeks tanah untuk memantau keberhasilan reforestasi dilakukan dengan metode pembobotan dengan nilai 1 untuk jumlah bobot pada semua peubah yang digunakan pada model (Jaya 2006). Penentuan bobot dilakukan secara empiris berdasarkan nilai koefisien regresi ganda hubungan antara lbds (y) dan nilai skor estimasi keberhasilan reforestasi pada setiap indikator (x). Rancangan model untuk merumuskan model indeks tanah untuk memantau keberhasilan reforestasi menggunakan analisis multikriteria dengan metode pembobotan. Bobot dari setiap indikator dan pengesah (*verifier*) diperoleh secara kuantitatif menggunakan analisis regresi ganda. Bobot dari setiap indikator disebut bobot makro, sedangkan bobot dari setiap pengesah dalam setiap indikator disebut dengan bobot mikro. Secara matematis model matematis dari model indeks tanah untuk memantau keberhasilan reforestasi ini dinyatakan dengan rumus:

$$y = FT \sum f_i a_i + BT \sum b_i b_i + KT \sum k_i c_i + SR \sum s_i d_i \quad [7]$$

$$FT + BT + KT + SR = 1 \quad [8]$$

keterangan:

y = indeks tingkat keberhasilan reforestasi

FT = bobot makro indeks fisika tanah

BT = bobot makro indeks biologi tanah

KT = bobot makro indeks kimia tanah

SR = bobot makro indeks serasah

f_i = bobot mikro indeks fisika tanah
 b_i = bobot mikro indeks biologi tanah
 k_i = bobot mikro indeks kimia tanah
 s_i = bobot mikro indeks serasah
 a_i = skor subfaktor indeks fisika tanah
 b_i = skor subfaktor indeks biologi tanah
 c_i = skor subfaktor indeks kimia tanah
 d_i = skor subfaktor indeks serasah

Penentuan bobot makro dinyatakan berdasarkan nilai koefisien regresi ganda menggunakan rumus-rumus:

1 Indeks tanah (analisis regresi ganda)

$$y = a + b_1BT + b_2FT + b_3KT + b_4SR \quad [9]$$

keterangan:

y = lbds
 a = *intercept*
 b_1, b_2, b_3, b_4 = koefisien regresi
 BT = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks biologi tanah
 FT = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks fisika tanah
 KT = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks kimia tanah
 SR = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks serasah

2 Indeks tanah (penentuan bobot makro)

$$w_i = \frac{b_i}{\sum_i^n b_i} \quad [10]$$

keterangan:

w_i = bobot makro indeks ke- i
 b_i = koefisien regresi indeks ke- i

3 Indeks FT (analisis regresi ganda)

$$y = a + b_1Bd + b_2Pr + b_3Ps \quad [11]$$

keterangan:

y = lbds
 a = *intercept*
 b_1, b_2, b_3 = koefisien regresi
 Bd = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks *bulk density*
 Pr = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks permeabilitas
 Ps = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks porositas

4 Indeks BT (analisis regresi ganda)

$$Y = a + b_1Res + b_2MO \quad [12]$$

keterangan:

Y = LBDS
 a = *intercept*
 b_1, b_2 = koefisien regresi
 Res = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks

respirasi

MO = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks mikroorganisme

5 Indeks KT (analisis regresi ganda)

$$y = a + b_1pH + b_2KTK + b_3unsur\ hara\ MM + b_4KB \quad [13]$$

keterangan:

y = lbds
 a = *intercept*
 b_1, b_2, b_3, b_4 = koefisien regresi
 pH = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks pH
 KTK = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks KTK
 $Unsur\ hara\ MM$ = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks unsur hara makro-mikro
 KB = skor estimasi tingkat keberhasilan reforestasi indeks kejenuhan basa

6 Indeks KT (penentuan bobot mikro)

$$w_i = \frac{b_i}{\sum_i^n b_i} \quad [14]$$

keterangan:

w_i = bobot mikro indeks ke- i
 b_i = koefisien regresi indeks ke- i

Hasil dan Pembahasan

Indeks serasah (SR) Hasil kajian indeks SR dikelompokkan sebagai (1) serasah dengan ketebalan < 5 cm dengan jumlah sedikit diberikan skor 1, (2) ketebalan < 5 cm dan tersebar relatif merata diberikan skor 2, (3) ketebalan 5–10 cm yang terdiri dari berbagai jenis serasah belum terdekomposisi diberikan skor 3, (4) ketebalan 5–10 cm yang terdiri dari berbagai jenis serasah sudah terdekomposisi diberikan skor 4, dan (5) ketebalan > 10 cm dan terdiri dari berbagai jenis serasah sudah terdekomposisi diberikan skor 5.

Pada kawasan reforestasi dijumpai serasah yang sudah terdekomposisi yaitu di bukit Butoh (umur 23 tahun) dan di Debi (umur 6 tahun). Besarnya nilai indeks SR ini tergantung pada jenis tanaman yang ditanam atau sudah dilakukan penyulaman pada bukit-bukit reforestasi tersebut, selain mengikuti perkembangan pertumbuhan menurut umur vegetasi.

Perumusan model keberhasilan reforestasi indeks SR. Hasil model penduga hubungan antara lbds (x) dan indeks SR (y) mempunyai koefisien determinasi sangat tinggi (85%) mengikuti persamaan [15]. Selanjutnya, model tersebut digunakan untuk menghitung nilai estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi pada indeks SR.

$$y = -0,00004x^2 + 0,026x + 0,813 \quad [15]$$

Indeks fisika tanah (FT) Pada kawasan reforestasi, indeks

tertinggi permeabilitas (Pr) ditemukan di Bukit Sumasang (tahun tanam 2007, umur 1 tahun) dengan indeks Pr sebesar 50,29 mm jam⁻¹. Indeks Pr terendah ditemukan di Bukit Watulabu (tahun tanam 2002, umur 6 tahun) dengan indeks Pr sebesar 1,13 mm jam⁻¹. Indeks Pr di kawasan reforestasi lainnya, yakni Bukit Butoh (tahun tanam 1985, umur 23 tahun) sebesar 25,27 mm jam⁻¹. Sedangkan, indeks Pr untuk kawasan hutan alam Lembo sebesar 70,61 mm jam⁻¹.

Dengan mengabaikan data pencilan dan asumsi bahwa tujuan keberhasilan reforestasi adalah meningkatnya nilai indeks Pr sesuai meningkatnya umur tanaman hingga mencapai kondisi hutan alam, dapat diprediksi bahwa hubungan antara lbds dan indeks Pr adalah tinggi ($R^2 = 73\%$) mengikuti persamaan [16]. Selanjutnya, model tersebut digunakan untuk menghitung nilai estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi indeks Pr. Pada kawasan reforestasi, indeks tertinggi porositas (Ps) ditemukan di Bukit Butoh sebesar 62,03%. Indeks terendah Ps ditemukan di Bukit Ulva (tahun tanam 2004, umur 4 tahun) dengan indeks Ps sebesar 42,42%. Adapun indeks Ps di Bukit Lembo hutan alam sebesar 67,32%. Dengan mengabaikan data *outlier* dan asumsi bahwa tujuan keberhasilan reforestasi dari indeks Ps akan terus meningkat sesuai meningkatnya umur tanaman sampai mencapai pada kondisi hutan alam maka dapat diprediksi hubungan antara lbds (x) dan indeks Ps (y) adalah tinggi ($R^2 = 93\%$) mengikuti persamaan [17]. Selanjutnya, model tersebut digunakan untuk menghitung nilai estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi pada indeks Ps.

$$y = 0,00007x^2 + 0,188x + 9,818 \quad [16]$$

$$y = 0,0007x^2 + 0,102x + 47,15 \quad [17]$$

Pada kawasan reforestasi, indeks terendah *bulk density* (Bd) ditemukan di Bukit Butoh dengan indeks sebesar 1,01 g cm⁻³. Indeks tertinggi Bd ditemukan di Bukit Koro North (tahun tanam 2000, umur 8 tahun) sebesar 1,48 g cm⁻³. Sedangkan, indeks Bd di Bukit Lembo hutan alam sebesar 0,87 g cm⁻³.

Dengan mengabaikan data *outlier* dan asumsi bahwa tujuan keberhasilan reforestasi adalah indeks Bd yang akan terus meningkat sesuai meningkatnya umur tanaman hingga mencapai kondisi hutan alam maka dapat diprediksi bahwa hubungan antara lbds (x) dan indeks Bd (y) adalah tinggi ($R^2 = 93\%$) mengikuti persamaan [18]. Selanjutnya model tersebut digunakan untuk menghitung nilai estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi pada indeks Bd.

$$y = 0,000003x^2 + 0,002x + 1,402 \quad [18]$$

Perumusan model keberhasilan reforestasi indeks FT
Berdasarkan koefisien regresi dari analisis regresi ganda antara lbds (y) dan skor estimasi keberhasilan reforestasi indeks Pr (x_1), Ps (x_2), dan Bd (x_3), dihitung bobot masing-masing indeks dan hasilnya dapat dilihat pada Tabel 1. Selanjutnya dengan menggunakan bobot indeks pada Tabel 1 dapat dirumuskan model untuk estimasi skor keberhasilan reforestasi indeks FT [19].

Tabel 1 Bobot indeks FT

Indeks FT	R	Bobot
Permeabilitas	2,6187	0,333
<i>Bulk density</i>	2,6187	0,333
Porositas	2,6187	0,333
Jumlah	7,856	1,000

$$\text{Skor FT} = 0,333\text{Bd} + 0,333\text{Pr} + 0,333\text{Ps} \quad [19]$$

Indeks biologi tanah (BT) Pada kawasan reforestasi, indeks respirasi (Res, dihitung per kg tanah per hari) tertinggi ditemukan di Bukit Watulabu (tahun tanam 2002, umur 6 tahun) sebesar 13,89 mg C-CO₂. Adapun indeks Res terendah ditemukan di Bukit Hasan North (tahun tanam 2000, umur 8 tahun) sebesar 6,68 mg C-CO₂. Sedangkan indeks Res di Bukit Butoh (umur 23 tahun, 7,89 tahun), dan di Lembo hutan alam yaitu sebesar 10,8 mg C-CO₂. Dengan mengabaikan data yang *outlier* dan asumsi bahwa tujuan keberhasilan reforestasi adalah indeks Res akan terus meningkat sesuai meningkatnya umur tanaman atau lbds hingga mencapai kondisi hutan alam maka dapat diprediksi bahwa terdapat hubungan yang erat ($R^2 = 82\%$) antara lbds (x) dan indeks Res (y) yang mengikuti persamaan [20]. Selanjutnya model tersebut digunakan untuk menghitung nilai estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi pada indeks Res. Pada kawasan reforestasi, indeks mikro organisme (Mo) yang tertinggi ditemukan di Hasan North (umur 8 tahun) sebesar $40,3 \times 10^6$ SPK g⁻¹. Indeks Mo di Bukit Butoh (tahun tanam 1985, umur 23 tahun) ditemukan sebesar $9,8 \times 10^6$ SPK g⁻¹. Adapun indeks Ps terendah terdapat di Bukit Sumasang (umur 1 tahun, tahun tanam 2007) sebesar $1,65 \times 10^6$ SPK g⁻¹. Sedangkan indeks Mo di Bukit Lembo hutan alam sebesar $11,5 \times 10^6$ SPK g⁻¹.

$$y = 0,000004x^2 + 0,015x + 6,121 \quad [20]$$

$$y = 0,000009x^2 + 0,010x + 7,877 \quad [21]$$

Dengan mengabaikan data yang *outlier* dan asumsi bahwa tujuan keberhasilan reforestasi indeks Mo akan terus meningkat sesuai meningkatnya umur tanaman atau lbds hingga mencapai kondisi hutan alam maka dapat diprediksi bahwa terdapat hubungan erat antara umur lbds dan indeks Mo ($R^2 = 89\%$) mengikuti persamaan [21]. Selanjutnya model tersebut digunakan untuk menghitung nilai estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi pada indeks Mo.

Perumusan model keberhasilan reforestasi indeks BT
Berdasarkan koefisien regresi dari analisis regresi ganda antara lbds (y) dan skor estimasi keberhasilan reforestasi indeks Res (x_1) dan Mo (x_2), dihitung bobot masing-masing indeks (Tabel 2). Selanjutnya dengan menggunakan bobot indeks pada Tabel 2 dirumuskan model untuk estimasi skor keberhasilan reforestasi indeks BT [22].

$$\text{Skor BT} = 0,500\text{Res} + 0,500\text{Mo} \quad [22]$$

Indeks kimia tanah (KT) Unsur KT merupakan unsur hara

Tabel 2 Bobot indeks BT

Indeks BT	R	Bobot
Respirasi	2,619	0,500
Mikro organisme	2,619	0,500
Jumlah	5,237	1,000

tanah yang diperlukan untuk pertumbuhan tanaman. Pada penelitian ini indeks KT ditentukan dengan menggunakan indikator indeks unsur hara makro dan mikro (MM), pH tanah (pH), kejenuhan basa (KB), dan kemampuan tukar kation (KTK).

Indeks unsur hara MM Unsur hara MM ditentukan dengan menggunakan indikator indeks unsur hara makro (makro) dan unsur hara mikro (mikro). Unsur hara makro yang digunakan pada penyusunan model adalah unsur karbon (C), nitrogen (N), fosfor (P), kalsium (Ca), magnesium (Mg), kalium (K), dan natrium (Na). Hasil observasi indeks makro pada setiap tahun tanam disajikan pada Tabel 3. Dari Tabel 3 dapat diketahui bahwa indeks unsur hara N di daerah penelitian berkisar antara sangat rendah–sedang dengan rata-rata sangat rendah (0,08%), sedang nilai terendah ditemukan di bukit Ponsesa (tahun tanam 2008) yaitu sebesar 0,02% dan tertinggi di bukit Debi (umur 6 tahun) yaitu sebesar 0,02%. Unsur hara C di daerah penelitian berkisar dari sangat rendah sampai tinggi dengan rata-rata sangat rendah yaitu sebesar 0,84%, sedang nilai terendah ditemukan di Bukit Watulabu (tahun tanam 2002, umur 6 tahun) yaitu sebesar 0,08% dan tertinggi di Bukit Debi umur 6 tahun yaitu sebesar 3,36. Unsur hara P di daerah penelitian berkisar dari sangat rendah sampai tinggi dengan rata-rata sangat rendah yaitu sebesar 2,96 ppm, sedang nilai terendah ditemukan di Bukit Pakalangkai (tahun tanam 2004, umur 4 tahun) sebesar 1,40 ppm dan tertinggi di Bukit Lembo hutan alam sebesar 14,60 ppm.

Unsur hara Ca di daerah penelitian berkisar dari sangat rendah sampai rendah dengan rata-rata rendah yaitu sebesar 2,95 me 100g⁻¹, sedang nilai terendah terdapat di Bukit

Ponsesa (tahun tanam 1999, umur 9 tahun) sebesar 0,94 me 100g⁻¹ dan tertinggi di Bukit Debi umur 6 tahun yaitu sebesar 5,05 me 100g⁻¹. Unsur hara Mg di daerah penelitian berkisar rendah–sangat tinggi dengan rata-rata sebesar 2,13 me 100g⁻¹, sedang nilai terendah adalah di Bukit Koro Nort (tahun tanam 2000, umur 8 tahun) sebesar 0,35 me 100g⁻¹ dan tertinggi di Bukit Butoh (umur 23 tahun) sebesar 8,82 me 100g⁻¹. Unsur hara K di daerah penelitian berkisar sangat rendah–sangat tinggi dengan rata-rata 0,11 me 100g⁻¹, sedang nilai terendah terdapat di Bukit Konde Nort (tahun tanam 2007, umur 1 tahun) sebesar 0,01 me 100g⁻¹ dan tertinggi di bukit Lembo hutan alam sebesar 1,10 me 100g⁻¹. Unsur hara Na di daerah penelitian mempunyai kategori rendah dengan rata-rata sebesar 0,12 me 100g⁻¹, sedang nilai terendah ditemukan di Bukit Sumasang (tahun tanam 2007, umur 1 tahun) sebesar 0,04 me 100g⁻¹ dan tertinggi di Bukit Ponsesa (tahun tanam 2008) sebesar 0,24 me 100g⁻¹.

Dengan asumsi bahwa tujuan keberhasilan reforestasi adalah indeks unsur hara makro akan terus meningkat sesuai meningkatnya umur tanaman sampai mencapai kondisi hutan alam dan terdapat hubungan antara lbs dan indeks unsur hara makro, perumusan dan validasi model keberhasilan reforestasi pada indeks unsur hara makro dilakukan dengan menggunakan analisis regresi hubungan antara lbs (x) dan indeks C, N, P, Ca, Mg, K, dan Na (y). Hasil model pendugaan disajikan pada Tabel 4. Selanjutnya model ini digunakan untuk menduga estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi indeks unsur hara makro.

Perumusan model indeks unsur hara makro dilakukan menggunakan analisis regresi ganda antara lbs (y) dan skor estimasi keberhasilan reforestasi indeks C, N, P, Ca, Mg, K, dan Na serta berdasarkan koefisien regresinya dihitung bobot masing-masing indeks (Tabel 5). Selanjutnya dengan menggunakan bobot indeks pada Tabel 5 dapat dirumuskan model untuk estimasi skor keberhasilan reforestasi indeks unsur hara makro tanah [23].

$$\text{Skor makro} = 0,143C + 0,143N + 0,143P + 0,143Ca + 0,143Mg + 0,143K + 0,143Na \quad [23]$$

Tabel 3 Unsur hara makro hasil observasi

Lokasi	Umur (tahun)	lbs (m ² ha ⁻¹)	N (%)	C (%)	P (ppm)	Ca (me 100g ⁻¹)	Mg (me 100g ⁻¹)	K (me 100g ⁻¹)	Na (me 100g ⁻¹)
Koro North	1	7	0,09	0,80	1,70	2,92	1,34	0,06	0,08
Ponsesa	2	6	0,03	0,24	1,90	1,56	1,70	0,09	0,16
Petea	3	56	0,13	1,28	4,80	4,19	0,52	0,20	0,17
Olivia	3	56	0,12	1,12	2,20	2,82	1,70	0,06	0,12
Koro South	4	30	0,22	2,32	2,00	3,77	0,46	0,07	0,10
Triple A	4	28	0,16	1,52	2,20	1,88	1,92	0,05	0,08
Rante 2002	6	47	0,06	0,56	2,00	1,39	3,68	0,04	0,08
Debi	6	117	0,06	0,72	1,70	2,39	0,98	0,08	0,12
Hasan North	8	64	0,04	0,32	2,20	3,07	2,18	0,07	0,08
Ponsesa	9	120	0,03	0,08	3,70	0,94	1,32	0,08	0,12
Butoh	23	141	0,13	1,20	3,40	2,45	8,82	0,04	0,05
Lembo	75	284	0,16	1,60	1,60	3,20	2,32	1,10	0,12

Tabel 4 Model penduga keberhasilan reforestasi indeks unsur hara makro

Indeks	Persamaan regresi	R^2 (%)
C	$y = 0,000006x^2 + 0,002x + 0,422$	74
N	$y = 0,000001x^2 + 0,000x + 0,037$	94
P	$y = 0,000x^2 - 0,022x + 2,333$	98
Ca	$y = 0,00003x^2 - 0,002x + 1,480$	70
Mg	$y = 0,00007x^2 + 0,008x + 1,104$	80
K	$y = 0,00002x^2 - 0,003x + 0,128$	98
Na	$y = 0,000008x^2 - 0,00009x + 0,086$	76

Tabel 5 Bobot indeks unsur hara makro

Indeks	R	Bobot
C	2,6187	0,143
N	2,6187	0,143
P	2,6187	0,143
Ca	2,6187	0,143
Mg	2,6187	0,143
K	2,6187	0,143
Na	2,6187	0,143
Jumlah	18,3309	1,000

Unsur hara mikro yang digunakan pada penyusunan model adalah unsur aluminium (Al), zat besi (Fe), tembaga (Cu), seng (Zn), mangan (Mn), dan bor (B). Hasil observasi indeks unsur hara mikro pada setiap tahun tanam disajikan pada Tabel 6. Tabel 6 menunjukkan bahwa indeks unsur hara Al di daerah penelitian berkategori sangat rendah yaitu < 1 me $100g^{-1}$. Analisis menunjukkan bahwa di semua kawasan reforestasi tidak terdeteksi adanya Al, sedang di hutan alam Lembo ditemukan kandungan Al sebesar 0,42 me $100g^{-1}$. Unsur hara Fe di daerah penelitian berkisar sangat rendah–sangat tinggi, tetapi nilai Fe rata-rata adalah tinggi (36,1 me $100g^{-1}$), sedang nilai terendah terdapat di Bukit Debi (tahun tanam 2002, umur 6 tahun) sebesar 1,1 me $100g^{-1}$ dan tertinggi di Bukit Ponsesa (umur 2 tahun) yaitu sebesar 157,8

me $100g^{-1}$. Unsur hara Cu di daerah penelitian mempunyai kandungan lebih dari cukup untuk pertumbuhan tanaman dengan nilai rata-rata sebesar 3,78 ppm, dengan nilai terendah terdapat di Bukit Konde North (tahun tanam 2007, umur 1 tahun) yaitu sebesar 1,52 ppm dan tertinggi di Bukit Ponsesa (umur 2 tahun) yaitu sebesar 8,0 ppm. Unsur hara Mn di daerah penelitian mempunyai kandungan lebih dari cukup untuk pertumbuhan tanaman dengan nilai rata-rata sebesar 49,61 ppm, dengan nilai terendah terdapat di Bukit Koro South (tahun tanam 2001, umur 7 tahun) yaitu sebesar 7,80 ppm dan tertinggi di Bukit Petea (umur 2 tahun) yaitu sebesar 128,88 ppm. Adapun unsur hara B di daerah penelitian mempunyai nilai rata-rata sebesar 0,27 ppm, dengan nilai terendah sebesar 0 ppm. Nilai ini tersebar hampir di semua bukit dan nilai tertinggi terdapat di Bukit Pakalangkai (umur 4 tahun) yaitu sebesar 1,86 ppm.

Dengan asumsi bahwa tujuan keberhasilan reforestasi adalah indeks unsur hara mikro memiliki hubungan linier terhadap umur tanaman sampai mencapai kondisi hutan alam, dan terdapat hubungan yang linier antara umur dan lbds, maka hubungan antara lbds (x) dan indeks mikro (y) dapat diprediksi. Perumusan dan validasi model keberhasilan reforestasi pada indeks unsur hara mikro dilakukan dengan menggunakan analisis regresi antara lbds (x) dan indeks Al, Fe, Cu, Zn, Mn, dan B (y). Hasil model digunakan untuk menduga estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi indeks unsur hara mikro (Tabel 7).

Perumusan model indeks unsur hara mikro dilakukan menggunakan analisis regresi ganda antara LBDS (y) dan skor estimasi keberhasilan reforestasi indeks Al, Fe, Cu, Zn, Mn, dan B (x), dan berdasarkan koefisien regresinya dihitung bobot masing-masing indeks (Tabel 8). Selanjutnya dengan menggunakan bobot indeks pada Tabel 8 dapat dirumuskan model untuk estimasi skor keberhasilan reforestasi indeks unsur hara mikro tanah [24].

$$\text{Skor mikro} = 0,289Cu + 0,289B + 0,207Al + 0,154Mn + 0,032Zn + 0,029Fe \quad [24]$$

Perumusan model keberhasilan reforestasi pada indeks

Tabel 6 Unsur hara mikro hasil observasi

Lokasi	Umur (tahun)	lbds ($m^2 ha^{-1}$)	Al (me $100 g^{-1}$)	Fe (me $100 g^{-1}$)	Cu (ppm)	Zn (ppm)	Mn (ppm)	B (ppm)
Koro North	1	7	0,00	36,0	4,88	4,9	59,72	0,00
Ponsesa	2	6	0,00	157,8	8,00	35,8	10,00	0,00
Petea	3	56	0,00	3,0	2,88	3,6	80,44	0,00
Olivia	3	56	0,00	46,5	4,72	6,7	87,88	0,00
Koro South	4	30	0,00	1,9	4,32	4,8	89,52	0,00
Triple A	4	28	0,00	1,8	5,04	8,2	14,76	0,00
Rante2002	6	47	0,00	117,2	5,00	33,6	8,00	0,05
Debi	6	117	0,00	5,1	1,92	1,7	30,68	0,00
Hasan North	8	64	0,00	3,1	2,92	4,1	115,56	0,00
Ponsesa	9	120	0,00	147,6	5,00	40,8	8,00	0,00
Butoh	23	141	0,00	2,0	1,92	3,5	43,20	0,12
Lembo	75	284	0,42	9,6	2,56	3,4	14,64	1,05

Tabel 7 Model penduga keberhasilan reforestasi indeks unsur hara mikro

Indeks	Persamaan Regresi	R^2 (%)
Al	$y = 0,000009x^2 - 0,001x + 0,025$	98
Fe	$y = 0,001x^2 - 0,439x + 48,47$	67
Cu	$y = 0,000x^2 - 0,058x + 6,920$	71
Zn	$y = 0,00002x^2 - 0,003x + 0,128$	86
Mn	$y = 0,00003x^2 - 0,015x + 5,100$	83
B	$y = 0,00002x^2 - 0,002x + 0,051$	73

Tabel 8 Bobot indeks unsur hara mikro

Indeks unsur hara mikro	R	Bobot
Cu	11,890	0,289
B	11,890	0,289
Al	8,520	0,207
Mn	6,315	0,154
Zn	1,319	0,032
Fe	1,172	0,029
Jumlah	41,106	1,000

unsur hara makro mikro (MM) dilakukan dengan menggunakan analisis pembobotan dari indeks unsur hara makro dan mikro. Berdasarkan nilai estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi dari indeks makro dan mikro dilakukan analisis regresi ganda antara LBDS (y) dan indeks makro (x_1) dan mikro (x_2) dan berdasarkan koefisien regresi ini dihitung bobot masing-masing indeks (Tabel 9). Berdasarkan bobot indeks pada Tabel 9 dapat dirumuskan model untuk estimasi skor keberhasilan reforestasi indeks unsur hara makro dan mikro tanah [25].

Skor MM = $0,695\text{makro} + 0,305\text{mikro}$ [25]

Indeks KTK, pH, dan KB Hasil observasi indeks KTK, pH, dan KB pada setiap tahun tanam disajikan pada Tabel 10. Dari tabel tersebut diketahui bahwa rata-rata indeks KTK

Tabel 9 Bobot indeks MM

Indeks unsur hara MM	R	Bobot
Unsur makro	5,036	0,695
Unsur mikro	2,214	0,305
Jumlah	7,250	1,000

di daerah penelitian dikategorikan rendah ($< 6,23$ me $100g^{-1}$). Nilai terendah KTK di kawasan reforestasi sebesar 3,40 me $100g^{-1}$ terdapat di Bukit Debi (umur 6 tahun) dan tertinggi sebesar 21,21 me $100g^{-1}$ yang terdapat di hutan alam Lembo. Indeks KB di daerah penelitian rata-rata dapat dikategori sebagai sangat tinggi (sebesar 80,0%). Nilai terendah terdapat di Bukit Ulva (tahun tanam 2004, umur 4 tahun) yaitu sebesar 3,40 me $100g^{-1}$ dan tertinggi sebesar 100% terdapat di beberapa tempat di wilayah reforestasi yang memiliki kandungan pH agak masam (5,9–6,5) dan netral (6,5–6,9).

Dengan asumsi bahwa tujuan keberhasilan reforestasi adalah indeks unsur hara mikro linier terhadap umur tanaman sampai mencapai kondisi hutan alam, dan terdapat hubungan yang linier antara umur dan lbsd maka dengan menggunakan beberapa tahun tanam dapat diprediksi hubungan antara lbsd dan indeks KTK, KB, serta pH. Perumusan model dan validasi keberhasilan reforestasi pada indeks KTK, KB, dan pH dilakukan dengan menggunakan analisis regresi antara lbsd (x) dan indeks KTK, KB, dan pH (y). Model ini digunakan untuk menduga estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi indeks KTK, KB, dan pH (Tabel 11).

Perumusan model keberhasilan reforestasi indeks KT

Perumusan model keberhasilan reforestasi pada indeks KT dilakukan dengan menggunakan analisis regresi ganda antara LBDS (y) dan nilai estimasi skor pencapaian keberhasilan reforestasi dari indeks unsur hara makro dan mikro (x_1) dan Indeks KTK (x_2), KB (x_3), dan pH (x_4). Berdasarkan koefisien regresi tersebut, bobot masing-masing indeks dihitung dengan hasil sebagaimana disajikan pada Tabel 12.

Tabel 10 Unsur hara KTK, KB, dan pH hasil observasi

Lokasi	Umur (tahun)	lbsd ($m^2 ha^{-1}$)	KTK (me $100g^{-1}$)	KB (%)	pH H_2O
Koro North	1	7	4,36	89,22	6,60
Ponsesa	2	6	7,18	31,75	6,20
Petea	3	56	4,71	10,00	6,90
Olivia	3	56	4,52	100,00	6,30
Koro South	4	30	4,28	100,00	6,90
Triple A	4	28	5,16	74,22	6,30
Rante2002	6	47	4,86	66,05	6,60
Debi	6	117	4,17	100,00	6,80
Hasan North	8	64	4,17	100,00	6,80
Ponsesa	9	120	6,54	35,02	6,30
Butoh	23	141	1,61	71,72	6,90
Lembo	75	284	2,21	38,66	6,00

Berdasarkan bobot indeks pada Tabel 12 dapat dirumuskan model untuk estimasi skor keberhasilan reforestasi indeks KT [26]. Model ini selanjutnya digunakan untuk menghitung skor keberhasilan reforestasi indeks unsur KT.

Tabel 11 Model penduga keberhasilan reforestasi indeks KTK, KB, dan pH

Indeks	Persamaan regresi	R^2 (%)
KT	$y = 0,000x^2 - 0,025x + 5,393$	92
KB	$y = -0,000x^2 - 0,069x + 80,34$	83
pH	$y = -0,00001x^2 + 0,001x + 6,709$	61

$$\text{Skor KT} = 0,343\text{pH} + 0,343\text{KTK} + 0,262\text{MM} + 0,052\text{KB} \quad [26]$$

Perumusan model keberhasilan reforestasi indeks tanah (T) Berdasarkan koefisien regresi dari analisis multikriteria dengan pembobotan dari indeks SR, BT, FT, dan KT dihitung bobot masing-masing indeks dengan hasil disajikan pada Tabel 13. Berdasarkan bobot indeks pada Tabel 13 dapat dirumuskan model untuk estimasi skor keberhasilan reforestasi indeks T [27].

$$\text{Skor T} = 0,493\text{KT} + 0,170\text{FT} + 0,328\text{BT} + 0,009\text{SR} \quad [27]$$

Tanah merupakan semua tempat di atas permukaan bumi yang terdiri dari komponen-komponen bahan organik, air, udara, dan mineral yang tercampur dengan merata dan berfungsi sebagai tempat tumbuh. Jamulya *et al.* (1990)

Tabel 12 Bobot indeks KT

Indeks KT	R	Bobot
pH	32,840	0,343
KTK	32,840	0,343
Unsur kimia MM	25,080	0,262
KB	4,970	0,052
Jumlah	95,730	1,000

menyatakan bahwa pada umumnya tumbuhan dapat berkembang dengan sempurna apabila komponen-komponen penyusun tanah adalah bahan organik (5%), air (20–30%), udara (20–30%), dan mineral (45%). Dalam penelitian ini indeks T yang digunakan pada model monitoring keberhasilan reforestasi adalah komponen-komponen tanah yang mempengaruhi kesuburan tanah sebagai tempat tumbuh dan dikelompokkan pada komponen KT, FT, BT, dan SR yang menutupi lantai hutan.

Komponen kimia dikelompokkan menjadi unsur hara MM, KTK, KB, dan pH yang menghasilkan model [28]. Berdasarkan model tersebut, bobot pH dan KTK adalah sama. Hal ini dapat terjadi karena KTK dan pH mempunyai fungsi yang sama dalam penyediaan hara bagi tanaman. Ketersediaan unsur hara MM dalam tanah memiliki bobot

Tabel 13 Bobot indeks T

Indeks T	R	Bobot
KT	100,77	0,493
BT	67,11	0,328
FT	34,70	0,170
Sr	1,78	0,009
Jumlah	204,36	1,000

lebih kecil dibandingkan KTK dan pH, karena meski ketersediaan unsur hara MM dalam tanah tinggi, tetapi apabila KTK redah dan pH sangat asam atau sangat basa maka ketersediaan unsur hara tanaman akan rendah. Adapun, KB memiliki hubungan yang signifikan dengan pH. Penurunan tingkat kejenuhan basa akan diikuti oleh penurunan nilai pH (Jamulya *et al.* 1990).

$$\text{Skor KT} = 0,343\text{pH} + 0,343\text{KTK} + 0,262\text{MM} + 0,052\text{KB} \quad [28]$$

Penanaman di daerah penelitian dilakukan pada lubang tanam dengan ukuran lebar 60 cm, panjang 60 cm dengan kedalaman 60 cm. Pada setiap lubang penanaman ini dilakukan pengapuran dengan dosis 0,4 kg. Proses pengapuran dapat meningkatkan pH dan KTK tanah. Suwarno *et al.* (2003) menyatakan bahwa KTK dan pH merupakan faktor yang mempengaruhi pengikatan, pengendapan, dan pergerakan ion ke akar, serta mempengaruhi pencucian maupun imobilisasi unsur-unsur hara tanaman atau faktor yang mempengaruhi kemampuan penyediaan hara bagi tanaman. Proses pengapuran dengan memakai limbah pembakaran batubara dicampur dengan bahan organik tanah dapat meningkatkan pH tanah. Pada area revegetasi tambang proses pengapuran dapat meningkatkan dan mempertahankan pH tersebut (Bem *et al.* 1998).

Unsur pH tanah merupakan reaksi tanah yang menyatakan derajat keasaman atau kebasahan tanah. Unsur ini sangat mempengaruhi pertumbuhan tanaman karena pH tanah sangat mempengaruhi ketersediaan unsur-unsur hara tanaman (semua unsur hara dalam larutan tanah tersedia dalam pH normal). Pengaruh tidak langsung terjadi apabila tanah sangat masam, mengakibatkan tanah bersifat racun. Hal ini ditemukan pada tanah organosol di daerah rawa. Pada tanah organosol tersebut terdapat endapan pirit yang mengandung unsur Al, Mn, dan Fe, sedangkan KTK mencerminkan kemampuan (kapasitas) partikel-partikel koloid tanah menukar atau mengabsorpsi kation-kation bebas dalam larutan tanah (Jamulya *et al.* 1990). Lebih lanjut, Moran dan Brondizio (1998) menyatakan bahwa pH, bahan organik, dan KTK mempengaruhi ketersediaan hara dalam tanah.

Setelah proses pengapuran, dilakukan pemupukan berupa campuran dari 0,4 kg urea, 0,4 kg KCl, 0,4 kg P, 0,4 kg pupuk kandang, dan 0,3 kg kompos. Proses pemupukan bertujuan meningkatkan unsur hara dalam tanah. Hasil

analisis laboratorium menunjukkan bahwa kandungan unsur hara rata-rata di hutan tanaman sangat rendah dengan kandungan unsur hara N dan C sebesar 0,5%, kandungan unsur hara P sebesar 2,7 ppm, dan kandungan unsur hara Ca, Mg, K, dan Na sebesar 1,3 me 100g⁻¹. Apabila dibandingkan, tidak terdapat perbedaan yang nyata antara unsur hara di hutan tanaman dengan unsur hara di hutan alam, kecuali pada unsur hara P. Kandungan unsur hara rata-rata yang ditemukan adalah 0,88% untuk unsur hara N dan C, dan 1,6 me 100g⁻¹ untuk kandungan unsur hara Ca, Mg, K, dan Na. Unsur hara P mempunyai nilai sangat tinggi yaitu 14,6 ppm.

Penanaman tumbuhan penutup tanah dilakukan untuk mempercepat pengembalian nutrisi organik ke tanah dari biomassa tumbuhan di sekitarnya, disamping untuk menjaga kelembapan tanah dan menekan laju pertumbuhan gulma di sekitar pangkal pohon, serta menahan laju erosi dan sedimentasi. Pada awalnya tumbuhan penutup tanaman yang dipergunakan di lokasi penelitian adalah uraso (*Sacharum* sp), tetapi mulai tahun 2003 penggunaan uraso telah diganti oleh *signal grass* (*Brachiaria decumbens*). Bersamaan dengan proses penggantian tumbuhan penutup di lokasi penelitian, pada lokasi penanaman juga dilakukan penggantian secara bertahap untuk tegakan tahun 2003 ke atas. *Signal grass* digunakan karena memiliki sifat yang dapat cepat tumbuh menutupi lahan, dapat berkembang pada daerah yang miskin hara, dan dapat mengontrol erosi. Tetapi penutupan tanah yang rapat mempunyai kelemahan yaitu dapat menghambat terjadinya rekolonisasi. Pada tahun 2005, penggunaan *signal grass* diganti dengan kombinasi dari beberapa tanaman yaitu *Leguminaceae*, wynn cassia (*Chamaecrista rotundifolia*), burgundy (*Macroptilium bracteatum*), bermuda (*Cynodon dactylon*), dan WF millet (*Panicum miliaceum*). Hadjowigeno (1993) menyatakan bahwa tanaman *Leguminaceae* dapat menambah N tanah, tidak berkompetisi dengan tanaman pokok, dan beberapa jenisnya sangat toleran terhadap tanah miskin.

Unsur hara dalam tanah yang paling sedikit diperlukan bagi pertumbuhan tanaman yang sehat adalah O, C, H, N, P, K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, Cl, Co, dan Si. Unsur hara yang diperlukan dalam jumlah banyak pada umumnya disebut unsur hara makro yaitu N, P, K, Ca, Mg, dan Na. Sedangkan unsur hara yang diperlukan dalam jumlah sedikit pada umumnya disebut unsur hara mikro yaitu Al, Fe, Mn, Zn, Cu, Mo, B, Cl, Co, dan Si (Hadjowigeno 1993).

Monitoring keberhasilan reforestasi indeks unsur hara MM dalam penelitian ini memberikan hasil indeks unsur hara makro mempunyai bobot lebih besar dari indeks unsur hara mikro dengan model [29]. Hal ini disebabkan unsur hara makro lebih berperan penting (diperlukan dalam jumlah besar) bagi pertumbuhan tanaman dibandingkan unsur hara mikro. Sedangkan unsur-unsur hara pentingnya sendiri mempunyai peran yang sama dalam pertumbuhan tanaman.

$$\text{MM} = 0,695\text{makro} + 0,305\text{mikro} \quad [29]$$

$$\text{Skor BT} = 0,500\text{Res} + 0,500\text{Mo} \quad [30]$$

Dalam aspek komponen BT, dalam penelitian ini dilakukan analisis jumlah total Mo dan Res mengikuti model [30]. Pada model ini, jumlah total Mo dan Res mempunyai bobot yang sama. Artinya, masing-masing sifat biologi tanah ini dapat digunakan bersama-sama, atau menggunakan salah satu dari sifat biologi tanah dalam model. Jumlah total Mo yang diamati adalah jumlah total Mo yang aktif dan tidak aktif, sedangkan yang dianalisis dalam Res adalah jumlah C dalam CO₂ pada Mo yang aktif. Karena kedua sifat ini mempunyai bobot yang sama, maka indeks Res adalah indeks yang dipilih dalam model. Hal ini disebabkan respirasi lebih menggambarkan peranan aktivitas Mo dalam penyediaan nutrisi dalam tanah. Menurut Jamulya *et al.* (1990), peranan utama Mo tanah adalah menguraikan bahan organik. Bahan organik yang mempunyai susunan yang kompleks diuraikan menjadi susunan-susunan senyawa yang sederhana, sebagai kation-kation bebas yang dapat diabsorpsi oleh tanaman.

Dalam penelitian ini, hal komponen sifat FT yang dianalisis adalah Bd, Pr, dan Ps mengikuti model [31]. Dalam model ini, Bd, Pr, dan Ps mempunyai bobot yang sama. Artinya masing-masing sifat tanah ini dapat digunakan bersama-sama, atau menggunakan salah satu dari sifat tanah dalam model. *Bulk density* atau bobot isi atau kerapatan isi dalam merupakan bobot kering tanah dalam keadaan utuh. Porositas merupakan persentase jumlah pori dalam tanah per volume massa tanah, sedangkan permeabilitas merupakan cepat atau lambatnya pergerakan air kearah vertikal atau horontal melalui pori-pori tanah (Jamulya *et al.* 1990). Ketiga sifat fisika tanah tersebut mempunyai pengaruh yang sama dalam penyediaan nutrisi dalam tanah. Pada tanah yang porous atau tanah-tanah yang bertekstur pasir terdapat pori-pori makro yang dominan, bobot isi rendah, dan sangat cepat meloloskan air. Hal ini menyebabkan ketersediaan hara dalam tanah yang porous menjadi rendah.

$$\text{Skor FT} = 0,333\text{Bd} + 0,333\text{Pr} + 0,333\text{Ps} \quad [31]$$

Hutan alam menghasilkan serasah secara terus menerus. Penguraian (dekomposisi) serasah akan membentuk humus yang memelihara dan memperkaya kandungan bahan organik dalam tanah. Dalam model monitoring keberhasilan reforestasi diketahui bahwa bobot indeks SR adalah yang terkecil. Artinya nilai indeks SR memberikan pengaruh paling kecil terhadap nilai total keberhasilan reforestasi, karena dalam kandungan bahan organik hasil dari proses dekomposisi sebagian sudah terkandung dalam nilai C dalam tanah.

Kesimpulan

Model Indeks Tanah untuk memantau keberhasilan reforestasi yang mengarah pada kembalinya struktur dan fungsi hutan pada rona awal adalah:

$$\text{Skor tanah (T)} = 0,493 \text{ KT} + 0,170 \text{ FT} + 0,328 \text{ BT} + 0,009 \text{ SR}$$

keterangan:

$$\text{Skor KT} = 0,343 \text{ pH} + 0,343 \text{ KTK} + 0,262 \text{ unsur hara MM}$$

+ 0,052 KB,

Skor FT = $0,333Bd + 0,333Pr + 0,333Ps$,

Skor BT = $0,500Res + 0,500MO$, dan

Skor SR = Skor estimasi keberhasilan indeks SR.

Hasil model hanya dapat digunakan di daerah penelitian atau pada daerah-daerah yang mempunyai karakteristik fisik yang sama dengan daerah penelitian diperlukan penelitian yang sama dengan menggunakan indikator atau indeks biofisik yang lain.

Ucapan Terima Kasih

Penulis mengucapkan terima kasih kepada BPPS dan PT INCO khususnya kepada Aris Priyo Ambodo dan staf yang telah memberikan dukungan data, dana, pemikiran, dan tenaga dalam penyelesaian penelitian di lapangan.

Daftar Pustaka

- Barrow CJ. 1991. *Land Degradation*. Great Britain: Cambridge University Press.
- Bem EM, Wiczorkowski P. 1998. Studies of radionuclide concentrations in surface soil in and around fly ash disposal sites. *Journal the Science of the Total Environment* 220:215–222.
- Draper NR, Smith H. 1992. *Analisis Regresi Terapan*. Sumantri B, penerjemah. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama. Terjemahan dari: Applied Regression Analysis.
- Hardjowigeno S. 1993. *Kesesuaian Lahan untuk Pengembangan Pertanian Daerah Rekreasi dan Bangunan*. Bogor: IPB Press.
- Jamulyo, Suprodjo SW. 1990. *Pengantar Geografi Tanah*. Yogyakarta: Gama Press.
- Jaya INS. 2006. *Teknik-teknik Pemodelan Spasial dalam Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan*. Bogor: Fakultas Kehutanan IPB.
- Lathwell DJ, Grove TL. 1986. Soil-plant relationship in the tropics. *Forest Ecology and Management* 139:93–108.
- Moran EF, Brondizio SE, Tucker JM, Forsberg Cracken SM, Falesi I. 2000. Effects of soil fertility and land-use on forest succession in Amazonia. *Journal Forest Ecology and Management* 139:93–108.
- Setiadi Y. 2005. *Restoration Degraded Land After Mining Operation*. Bogor: Faculty of Forestry IPB.
- Spurr SH. 1952. *Forest Inventory*. New York: The Ronald Press Company.
- Suwarno, Wahjudin UM, Leiwakabessy FM. 2003. *Kesuburan Tanah*. Bogor: Fakultas Pertanian IPB.